

·新能源汽车制动能量回收策略专题·

电动汽车多参数模型预测制动能量跟踪策略*

张巍 高妍 张红娟

(太原理工大学,太原 030024)

【摘要】针对电机制动能量回收率低和直流母线电压波动大的问题,提出了考虑电机功率、双向DC/DC变换器效率、超级电容电压等多个参数实时调整超级电容电流参考值的制动能量跟踪策略。采用储能单元的离散状态空间模型预测超级电容的电流和电压,并结合系统中多个参数计算超级电容的电流参考值。使用基于比例积分(PI)的电流环控制超级电容电流实时跟踪参考值,实现超级电容对电机能量的跟踪。通过仿真分析和对比试验,结果表明:所提出的策略能够将制动能量的回收效率由55.93%提升至86.76%,直流母线的电压波动范围抑制在0.9%以内。

主题词:状态空间模型 双向DC/DC变换器 制动能量跟踪

中图分类号:TM912 **文献标志码:**A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20231214

Multi-Parameter Model Prediction of Braking Energy Tracking Strategy for Electric Vehicles

Zhang Wei, Gao Yan, Zhang Hongjuan

(Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024)

【Abstract】To address the issues of a low recovery rate of motor braking energy and significant fluctuations in the DC bus voltage, a braking energy tracking strategy is put forward. This strategy can adjust the reference value of the supercapacitor current in real time by considering multiple parameters, including motor power, the efficiency of the bidirectional DC/DC converter, and the supercapacitor voltage. The discrete state space model of the energy storage unit is used to predict the current and voltage of the supercapacitor, and the current reference value of the supercapacitor is calculated by combining the other parameters in the system. The current loop based on Proportional-Integral (PI) is used to control the current of the supercapacitor and track the reference value of the current in real time. Simulation and experiments compared the tracking of regenerative energy under two different control strategies. The results indicate that the proposed strategy enhances the efficiency of regenerative energy recovery from 55.93% to 86.76%, and it restricts the voltage fluctuation of the DC bus within 0.9%.

Key words: State space model, Bidirectional DC/DC converter, Braking energy tracking

【引用格式】张巍,高妍,张红娟.电动汽车多参数模型预测制动能量跟踪策略[J].汽车技术,2025(1):20-25.

ZHANG W, GAO Y, ZHANG H J. Multi-Parameter Model Prediction of Braking Energy Tracking Strategy for Electric Vehicles[J]. Automobile Technology, 2025(1): 20-25.

1 前言

电机驱动系统的再生制动在电动汽车、电力轨道交通等领域应用广泛^[1-2],其能量储存系统由超级电容器和双向DC/DC变换器组成。当电机制动时,双向DC/DC变换器可控制超级电容的功率流,使能量合理流动^[3]。由于电动汽车制动工况具有不确定性,制动能量若无法被完全吸收,将聚集在直流母线上,导致母

线电压快速上升^[4]。同时,电机运行过程中电池组与超级电容间多余的能量循环,极易造成系统的能量损失^[5]。因此,控制超级电容对制动能量的准确跟踪至关重要。

Duan等^[6]基于比例积分(Proportional-Integral, PI)的双闭环控制方法,使超级电容在汽轮机瞬时输出功率不足时快速补偿功率,但该方法未考虑实际系统中变换器的效率。变换器在轻载状态下效率偏低^[7],为了准确

*基金项目:山西省基础研究计划项目(202303021211046)。

跟踪制动能量的变化过程,需实时考虑双向DC/DC变换器的效率。Zhang等^[8]结合迭代学习控制与模型预测控制获得电流参考值轨迹,通过主动约束搜索法得到轨迹最优解,提高了控制准确性。但在确定电流参考值轨迹时,该方法并未考虑超级电容电压状态的变化。Xu等^[9]使用超级电容对负载功率的高频部分进行响应,但阻性负载不能全面模拟电机运行情况。

为了准确跟踪电机制动时产生的制动能量,本文综合考虑电机功率、双向DC/DC变换器效率和超级电容电压状态等多个参数,提出模型预测制动能量跟踪策略,并通过对比试验验证提出策略的有效性。

2 多参数模型预测制动能量跟踪策略

2.1 系统结构

电动汽车的电机驱动系统结构如图1所示。其中,电池组电压为204 V,经DC/DC变换器升压至555 V;超级电容器通过双向DC/DC变换器吸收制动能量;电机驱动系统由永磁同步电机和变频器组成,负责模拟车辆工况;功率分析仪采集电机功率信号和功率因数;电路中其他电压、电流信号通过采集和滤波单元流入上位机。

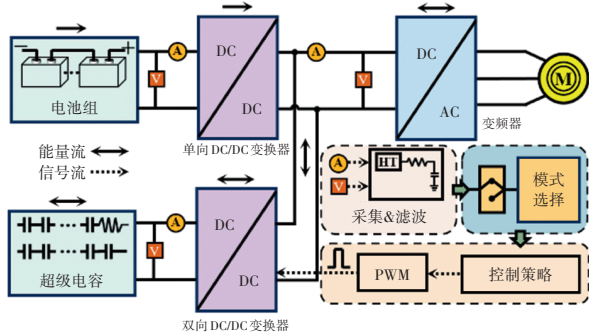


图1 电机驱动系统结构

本文提出的多参数模型预测能量跟踪策略由4个模块构成,分别为变换器模式选择模块、超级电容电压电流预测模块、多参数协同计算电流参考值模块和电流环控制生成脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)信号模块,如图2所示。当电机功率大于0时,双向DC/DC变换器将处于升压(BOOST)模式,储能系统向电机供能;当电机功率小于0时,变换器处于降压(BUCK)模式,超级电容吸收制动能量。通过离散化储能单元的状态空间模型,实现超级电容电压与电流的预测。结合电机功率、双向DC/DC变换器效率等参数,可计算超级电容的电流参考值。在生成PWM信号时,基于PI的电流环,使超级电容的电流尽可能跟踪电流参考值,并将其等效为超级电容释放/吸收的功率量,实现对制动能量的跟踪。

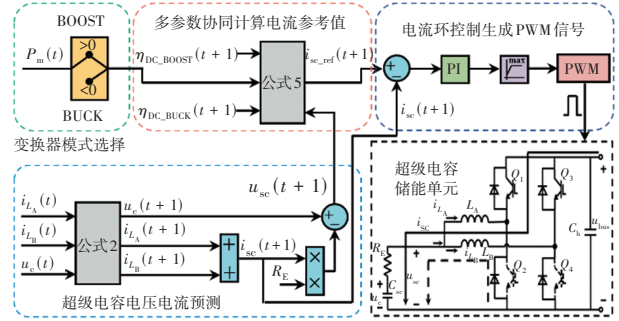
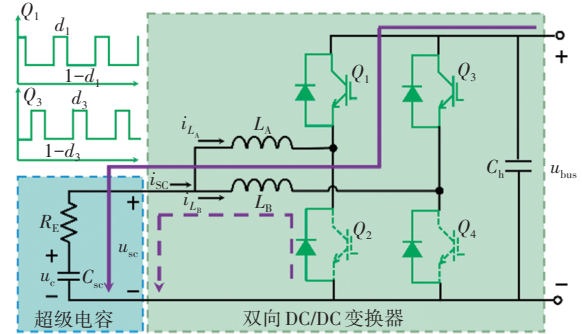


图2 多参数模型预测制动能量跟踪策略

2.2 超级电容电压与电流的预测

建立超级电容储能单元的连续时间状态空间模型,包括超级电容单元和双向DC/DC变换器,如图3所示。采用内阻等效模型反映超级电容的充/放电特性,将其等效为一个理想电容 C_{sc} 和内阻 R_E 串联。并联的拓扑结构能够降低输出电流纹波、减小变换器体积,从而提高变换器的总功率。



Q: 绝缘栅双极晶体管 (Insulate-Gate Bipolar Transistor, IGBT)

图3 超级电容储能单元

以BUCK模式为例,使用状态空间平均法,构建储能单元的连续时间状态空间模型(见式1),模型参数如表1所示。

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{L_A}}{dt} \\ \frac{di_{L_B}}{dt} \\ \frac{du_c}{dt} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} i_{L_A} \\ i_{L_B} \\ u_c \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_3 \end{bmatrix} + \mathbf{B}_0 \quad (1)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{R_E}{L_A} & -\frac{R_E}{L_A} & \frac{1}{L_A} \\ -\frac{R_E}{L_B} & -\frac{R_E}{L_B} & \frac{1}{L_B} \\ -\frac{1}{C_{sc}} & -\frac{1}{C_{sc}} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} \frac{u_D}{L_A} \\ \frac{u_D}{L_B} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{u_Q - u_D - u_{bus}}{L_A} & 0 \\ 0 & \frac{u_Q - u_D - u_{bus}}{L_B} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

表1 储能单元模型参数

参数	取值	参数	取值
母线电压 u_{bus}/V	555	二极管压降 u_D/V	2
DC/DC 高压侧稳压电容 $C_h/\mu F$	30	超级电容 C_{sc}/F	10
电感 $L_A=L_B/\mu H$	120	IGBT 占空比 $d_1\sim d_4$	0~1
IGBT 压降 u_Q/V	4	超级电容内阻 R_E/Ω	0.8

使用零阶保持法对连续时间状态空间模型进行离散化处理,得到离散状态空间模型为:

$$\begin{bmatrix} i_{L_A}(t+1) \\ i_{L_B}(t+1) \\ u_c(t+1) \end{bmatrix} = \Phi \begin{bmatrix} i_{L_A}(t) \\ i_{L_B}(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} + G \begin{bmatrix} d_1(t) \\ d_3(t) \end{bmatrix} + A \quad (2)$$

$$\Phi = e^{AT_s}, \quad G = \int_0^{T_s} e^{At} B dt, \quad A = \int_0^{T_s} e^{At} B_0 dt$$

式中: Φ 、 G 、 A 分别为矩阵变换中间量, $i_{L_A}(t+1)$ 、 $i_{L_B}(t+1)$ 分别为电感 L_A 和 L_B 在 $(t+1)$ 时刻的预测电流, $u_c(t+1)$ 为理想电容 C_{sc} 在 $(t+1)$ 时刻的预测电压, $d_1(t)$ 、 $d_3(t)$ 分别为 Q_1 、 Q_3 在 t 时刻的占空比, $T_s=1/18\,000$ s 为采样时间。

超级电容电流由电感 L_A 和 L_B 平均承担,因此超级电容的电流与电压的预测值分别为:

$$\begin{cases} i_{sc}(t+1) = i_{L_A}(t+1) + i_{L_B}(t+1) \\ u_{sc}(t+1) = u_c(t+1) - i_{sc}(t+1)R_E \end{cases} \quad (3)$$

2.3 多参数协同计算电流参考值

不同制动工况下,为了保证超级电容吸收电机全部制动能量,可将其功率等效为电感 L_A 、 L_B 的电流之和(超级电容的电流),即通过电流参考值进行能量跟踪。由于超级电容的电压和电流、直流母线的电压和电流、电机功率、双向 DC/DC 效率均会影响电流参考值的稳定性,所以需综合考虑上述参数,得到电流参考值为:

$$i_{sc_ref}(t+1) = \begin{cases} \frac{P_m(t)\eta_{DC_BUCK}(t+1)}{u_{sc}(t+1)}, \text{BUCK} \\ \frac{P_m(t)}{\eta_{DC_BOOST}(t+1)u_{sc}(t+1)}, \text{BOOST} \end{cases} \quad (4)$$

$$\eta_{DC_BUCK}(t+1) = \frac{u_{sc}(t+1)i_{sc}(t+1)}{u_{bus}(t)i_{bus}(t)}$$

$$\eta_{DC_BOOST}(t+1) = \frac{u_{bus}(t)i_{bus}(t)}{u_{sc}(t+1)i_{sc}(t+1)}$$

式中: $P_m(t)$ 为 t 时刻采集的电机功率, $\eta_{DC_BUCK}(t+1)$ 、 $\eta_{DC_BOOST}(t+1)$ 分别为在 BUCK 和 BOOST 模式下双向 DC/DC 变换器的效率, $u_{bus}(t)$ 、 $i_{bus}(t)$ 分别为实际测量的直流母线电压和电流。

2.4 电流环控制的约束条件

在系统中,DC/DC 变换器、超级电容等元件的电流、电压约束为:

$$-22 -$$

$$\begin{cases} u_{sc,\min} \leq u_{sc} \leq u_{sc,\max} \\ i_{sc,\min} \leq i_{sc} \leq i_{sc,\max} \\ u_{bus,\min} \leq u_{bus} \leq u_{bus,\max} \\ 0 \leq \eta_{DC_BUCK/BOOST} \leq 1 \\ 0 \leq d_i \leq 1, \quad i = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $u_{sc,\max}$ 、 $u_{sc,\min}$ 分别为超级电容电压的最大值和最小值, $i_{sc,\max}$ 、 $i_{sc,\min}$ 分别为超级电容电流的最大值和最小值, $u_{bus,\max}$ 、 $u_{bus,\min}$ 分别为直流母线电压的最大值和最小值, $\eta_{DC_BUCK/BOOST}$ 为变换器效率约束。

3 仿真结果分析

为了验证多参数模型预测制动能量跟踪策略的合理性,在 Matlab/Simulink 中进行仿真分析,系统参数如表 2 所示。

表2 仿真系统参数

参数	超级电容电压约束/V	超级电容电流约束/A	C_{sc}/F	R_E/Ω	T_s/s
取值	(90,220)	(-7,7)	10	0.8	10^{-5}

在电动状态下,使用多参数模型预测能量跟踪策略对电机进行仿真分析,结果如图 4 所示。图 4a 中,当电机功率为正时,电机处于电动状态;相反,电机则处于制动发电状态。图 4b 中,在 19.7~29.3 s 时,电机功率为 943 W;29.8~44.3 s 时,由于 i_{sc_ref} 的最大放电电流被约束至 7 A,超级电容电压由 122 V 降低至 114 V,导致超级电容的放电功率降至 567 W。电流为正,表示储能单元放电;电流为负,表示储能单元充电。整个过程的能量合理流动,母线电压始终保持在 550 V(见图 4c)。图 4d 中,电机电动状态中,由超级电容供电;当超级电容供电功率不足时,由电池组补足剩余功率。为了满足电机功率需求,电池组的放电电流 i_{bat} 由 0.171 A 增至 0.296 A。在 29.8~44.3 s 时,电机由超级电容单独供电, $i_{bat}=0$ A。

在制动状态下,电机的仿真分析如图 5 所示。图 5a 中在 64.2~64.9 s 时,电机功率由 324 W 骤增至 509 W;在 74.1~74.7 s 时,由 492 W 增至 648 W;89.2~89.7 s 时,由 634 W 降至 341 W。若瞬时产生的大量制动能量未能被超级电容吸收,将会积聚在直流母线上,导致直流母线电压升高。图 5b 中, i_{sc_ref} 和 i_{sc} 的波形基本重合,表明电流环的控制可以实现 i_{sc} 对 i_{sc_ref} 快速且准确的跟踪。图 5c 中,直流母线电压始终保持在 555 V,说明制动能量完全被超级电容吸收,直流母线上没有能量积聚。在电机制动过程中,电池组电流 i_{bat} 始终为 0 A,所以超级电容无需从电池组吸收能量。

因此,仿真结果表明:本文提出的能量跟踪策略能够实时调整电机、超级电容和电池组间的功率流。在电

机制动时,制动能量可以被超级电容充分吸收,不会在直流母线上聚集,使其电压升高。同时,超级电容无需从电池组吸收能量,造成能量浪费。

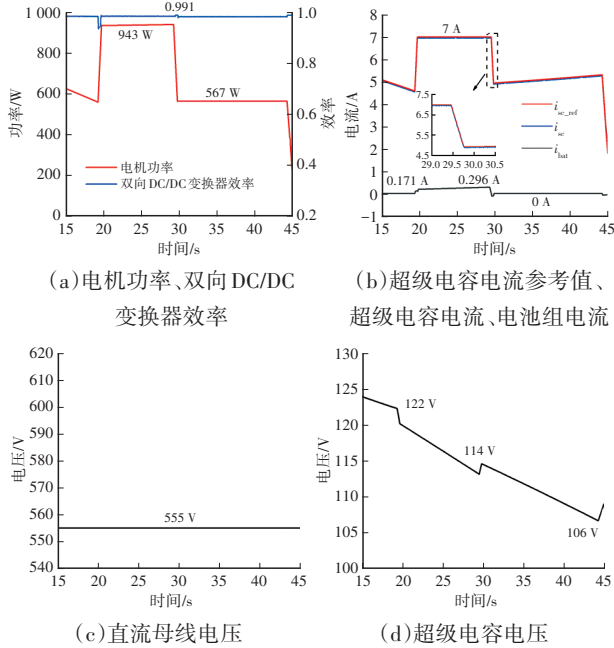


图4 电动状态下仿真分析

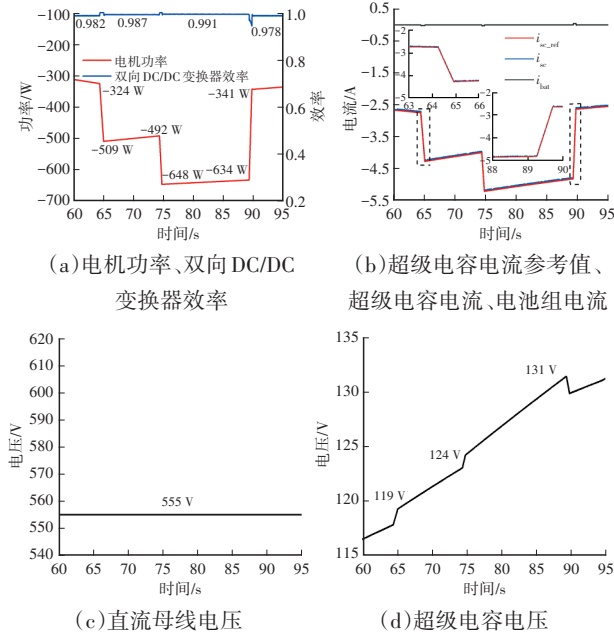


图5 制动状态下仿真工况

4 试验结果分析

为了进一步验证本文策略的有效性,通过搭建电动汽车电机驱动系统试验平台,对比分析本文策略和双闭环控制策略的直流母线电压波动与能量跟踪情况。

其中,使用2台额定功率为1.1 kW的永磁同步电机模拟电机的电动和制动工况;双向DC/DC变换器的额定功率为2 kW;超级电容、电池组的额定电压分别为

200 V和204 V;将dSPACE作为控制器,实现上位机的控制策略,其他参数与仿真工况相同。

$$\text{根据 } S = \frac{|u_{\text{bus,max}} - u_{\text{bus,ref}}|}{u_{\text{bus,ref}}} \times 100\% \text{ 衡量母线电压波动,}$$

其中, $u_{\text{bus,max}}$ 为母线电压的最大值, $u_{\text{bus,ref}}$ 为母线电压的期望值。当 $S \leq 10\%$ 时,表明电压稳定。

4.1 双闭环控制策略

传统双闭环控制策略以超级电容电压环为外环,超级电容电流环为内环,如图6所示,当超级电压放电时,外环电压参考值为100 V;当超级电容充电时,外环电压参考值为200 V。由于该策略不能根据电机功率的变化实时调节电流参考值,因此,通过引入恒流充放电参考值 $i_{\text{sc,ref}2}$,调节超级电容充/放电速度。经仿真验证,电压环控制器中比例系数 $K_p=0.4$,积分系数 $K_i=10$,电流环控制器中 $K_p=0.005, K_i=4$ 。

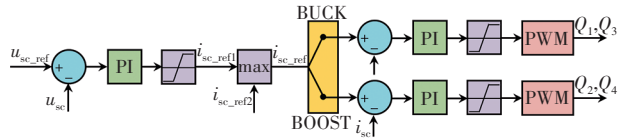


图6 传统双闭环控制策略

在电机电动状态下,双闭环控制策略结果如图7所示。在30.2~44.1 s时,超级电容的放电电流为4.6 A,电池组的放电电流为0.26 A。由于双闭环控制下超级电容电流参考值极小,超级电容无法承担电机所需的全部功率,导致电池放电。电池组的额外放电会消耗电能,影响车辆续航能力。在29.71 s时,直流母线电压为564 V,电压波动范围达到1.6%。

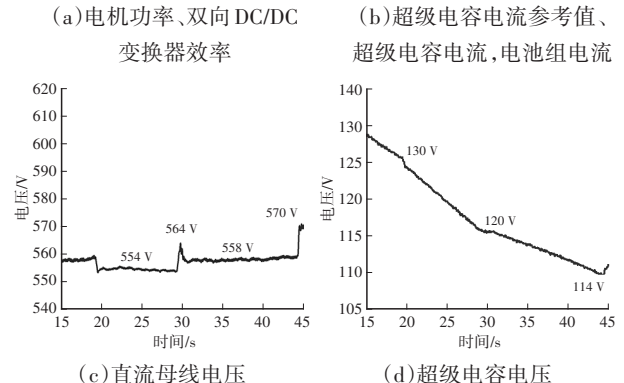
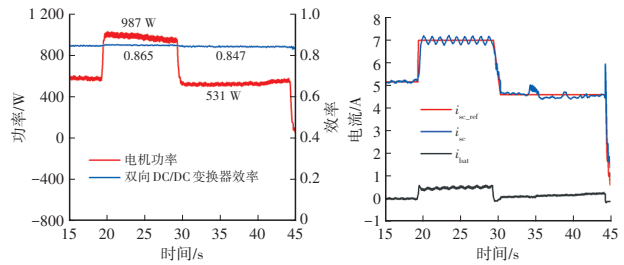


图7 电动状态下双闭环控制策略实际工况

在电机制动状态下,双闭环控制策略结果如图8所示。图8b中,该工况下 $i_{bat}=0$ A,表明电池组不吸收能量。图8c中,在64.9~74.1 s时,直流母线电压由599 V上升至606 V;74.9~89.2 s时,电压由618 V上升至632 V,母线电压波动范围为13.8%,不符合稳压要求。图8d中,超级电容电压从117 V上升至125 V。传统双闭环控制策略中,超级电容的电流参考值不能根据电机功率、超级电容电压等参数变化实时调整,超级电容不能吸收全部电机制动能量,导致未吸收能量在直流母线聚集,引起母线电压升高。

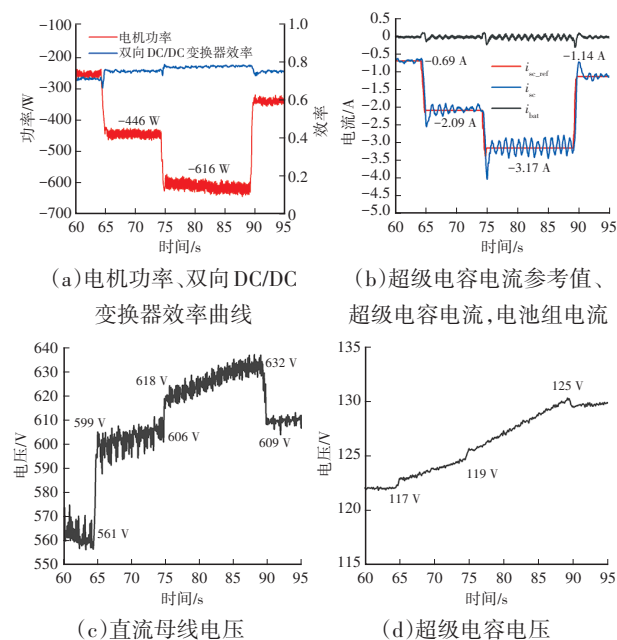


图8 制动状态下双闭环控制策略实际工况

4.2 多参数模型预测制动能量跟踪策略

在电动状态下,本文策略结果如图9所示。图9a中,各阶段双向DC/DC变换器的效率不同,所以在电流参考值的计算过程中,考虑变换器效率是十分必要的。试验中,双向DC/DC变换器的实际效率低于仿真效率。图9b可知,在电流环控制下,即使 i_{sc_ref} 快速变化, i_{sc} 依然能快速跟踪 i_{sc_ref} 。当 i_{sc_ref} 被限制在7 A时,电池组为了补足电机所需功率, i_{bat} 从0.25 A增加至0.52 A,实际结果与仿真一致。图9c中,在19.5~29.1 s时,直流母线电压为550 V,比期望电压低5 V。因此,本文策略的电压波动范围为0.9%,超级电容的电压由124 V降低至104 V。

在制动状态下,本文策略结果如图10所示。图10a中,在63.9~65.2 s时,电机功率由325 W骤增至509 W;在73.9~75.1 s时,功率由475 W增至624 W;在88.9~89.6 s时,功率由608 W降至331 W。双向DC/DC变换器4个阶段的效率分别为0.789、0.836、0.851、0.809,轻载状态下效率偏低。图10c中,在63~66 s和88~90 s

时,通过对 i_{sc_ref} 和 i_{sc} 进行放大处理可知,当 i_{sc_ref} 快速变化时, i_{sc} 能够对其跟踪,直流母线电压在551~558 V间波动,波动范围为0.72%。图10d中,电压从113 V上升至127 V,此时,电机制动能量被超级电容吸收。

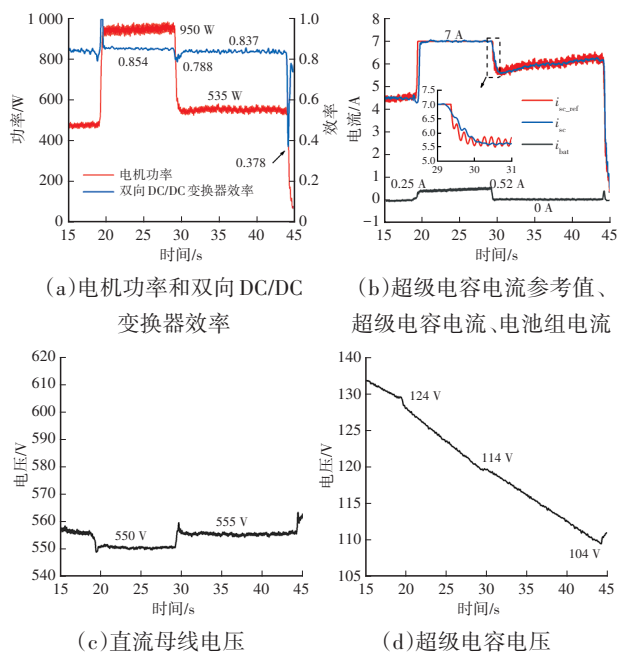


图9 电动状态下本文策略实际工况

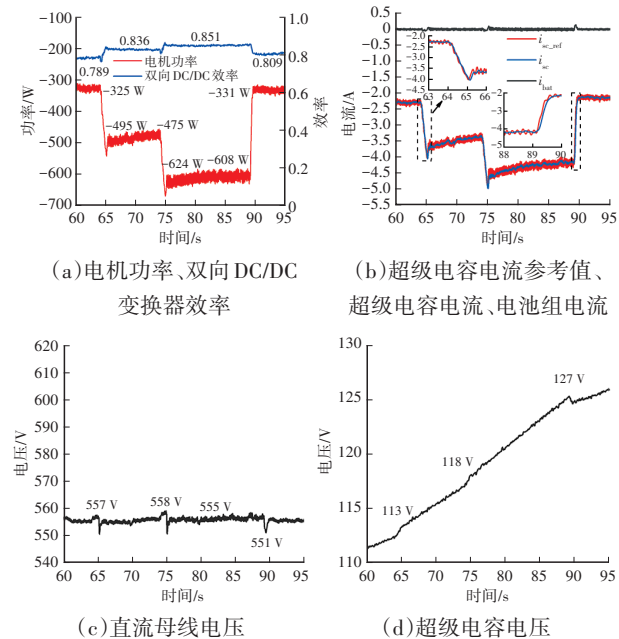


图10 制动状态下本文策略实际工况

对比两种控制策略下超级电容的功率,结果如图11所示。在60~95 s内,电机共产生16 725.38 J能量。双闭环控制策略下,超级电容吸收9 353.87 J能量,能量回收率为55.93%;本文策略中,超级电容吸收14 511.71 J能量,能量回收率为86.76%。相较于与双闭环控制策略,本文策略能够将全部制动能量回收至超级电容中,超级电容电压上升了14 V。

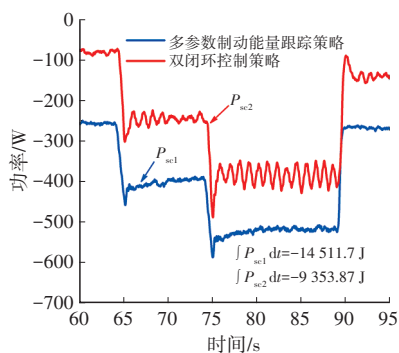


图 11 电机制动时超级电容功率

在相同制动工况下,双闭环控制策略的能量回收率为 55.93%,本文提出策略的能量回收率达到 86.76%;双闭环控制策略的直流母线电压波动范围为 13.8%,本文提出策略的直流母线电压波动范围为 0.9%,有效抑制了直流母线电压的波动。

5 结束语

针对电机制动能量回收率低、直流母线电压升高的问题,本文提出了考虑电机功率、双向 DC/DC 变换器效率、超级电容电压等多个参数实时调整超级电容电流参考值的制动能量跟踪策略。通过仿真和试验,对比分析了本文策略和双闭环控制策略的控制效果。本文策略的能量回收率提升至 86.76%,直流母线电压波动抑制在 0.9% 以内,但双向 DC/DC 变换器的工作效率仅在 83% 左右。未来,考虑通过使用新型氮化镓开关或软开关技术提高变换器的工作效率,确保能量在传输和回收过程中的高效利用。

参考文献

- [1] 申永鹏,谢俊超,梁伟华,等. 电动汽车混合储能系统 CEEMD-PE 能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 122-131.
- SHEN Y P, XIE J C, LIANG W H, et al. Electric Vehicle Hybrid Energy Storage System CEEMD-PE Energy Management Strategy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 122-131.
- [2] KOUCHACHVILI L, YAİCI W, ENTCHEV E. Hybrid

Battery/Supercapacitor Energy Storage System for the Electric Vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2018, 374(15): 237-248.

- [3] ASENSIO E M, MAGALLAN G A, PEREZ L, et al. Short-Term Power Demand Prediction for Energy Management of an Electric Vehicle Based on Batteries and Ultracapacitors[J]. Energy, 2022, 247.
- [4] CHEN J. Y, HU H T, GE Y B, et al. An Energy Storage System for Recycling Regenerative Braking Energy in High-Speed Railway[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 320-330.
- [5] ZHANG H J, ZHANG F, YANG L, et al. Multi-Parameter Collaborative Power Prediction to Improve the Efficiency of Supercapacitor-Based Regenerative Braking System[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(4): 2612-2622.
- [6] DUAN J D, FAN S G, WU F J, et al. Power Balance Control of Micro Gas Turbine Generation System Based on Supercapacitor Energy Storage[J]. Energy, 2017, 119: 442-452.
- [7] 程明谊,李志忠. 一种提高双向 DC-DC 变换器轻载效率的变频控制策略[J]. 电气应用, 2017, 36(19): 79-82+85.
- CHENG M Y, LI Z Z. A Frequency Conversion Control Strategy to Improve the Light-Load Efficiency of Bidirectional DC-DC Converter[J]. Electrotechnical Application, 2017, 36(19): 79-82+85.
- [8] ZHANG X B, WANG B F, GAMAGE D, et al. Model Predictive and Iterative Learning Control Based Hybrid Control Method for Hybrid Energy Storage System[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4): 2146-2158.
- [9] XU Q W, XIAO J F, WANG P, et al. A Decentralized Control Strategy for Autonomous Transient Power Sharing and State-of-Charge Recovery in Hybrid Energy Storage Systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1443-1452.

(责任编辑 瑞 秋)

修改稿收到日期为 2024 年 3 月 19 日。